

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ВДЫХАЕМОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ИНСПИРАТОРНЫЕ ДЫХАТЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ И ДАВЛЕНИЕ В ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЯХ ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ С УПРАВЛЯЕМЫМ ОБЪЕМОМ И ДАВЛЕНИЕМ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

И.Н. Грачев, А.В. Щеголев

Федеральное государственное бюджетное военно-образовательное учреждение высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург

Целью исследования явилась оценка влияния состава вдыхаемой газовой смеси на регистрируемые показатели инспираторного дыхательного объема при искусственной вентиляции легких (ИВЛ) с управляемым объемом и инспираторного давления в дыхательных путях при вентиляции легких с управляемым давлением. Для проведения ИВЛ смесью гелия и кислорода использовали аппарат Hamilton G5 (Hamilton Medical, Швейцария) с блоком, обеспечивающим возможность подачи данного вида смеси. Для имитации легких использовали TestChest® Respiratory Flight Simulator (Organis GmbH, Швейцария) с параметрами настройки, отражающими респираторную систему пациента как в норме, так и при патологии. По результатам исследования установлено, что состав вдыхаемой газовой смеси при вентиляции легких с управляемым объемом не влияет на регистрируемый инспираторный дыхательный объем на модели нормальных и патологических легких. Однако при искусственной вентиляции легких смесью гелия и кислорода с управляемым давлением выявлены статистически значимые различия регистрируемого инспираторного давления в дыхательных путях на модели легких в сравнении с проведением ИВЛ кислородно-воздушной смесью.

- **Ключевые слова:** смесь гелия и кислорода, кислородно-воздушная смесь, искусственная вентиляция легких, модель легких

Для корреспонденции: Грачев Иван Николаевич — адъюнкт кафедры анестезиологии и реаниматологии Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург; e-mail: GrachewIN@mail.ru

Для цитирования: Грачев И.Н., Щеголев А.В. Влияние состава вдыхаемой газовой смеси на инспираторные дыхательный объем и давление в дыхательных путях при искусственной вентиляции легких с управляемым объемом и давлением (экспериментальное исследование). Вестник интенсивной терапии имени А.И. Салтанова. 2018;2:61–8.

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF INHALED GAS MIXTURE IN THE INSPIRATORY TIDAL VOLUME AND AIRWAY PRESSURE DURING MECHANICAL VENTILATION WITH CONTROLLED VOLUME AND PRESSURE (EXPERIMENTAL STUDY)

I.N. Grachev, A.V. Shchegolev

Federal State Budget Military Educational Institution of Higher Education Military Medical Academy named after S.M. Kirov of the Ministry of Defense of Russian Federation, St. Petersburg

The aim of the study was to assess the effect of the composition of the inhaled gas mixture on the recorded indicators of inspiratory respiratory volume in ventilator with controlled volume, and inspiratory pressure in the Airways, in ventilator with controlled pressure. To carry out the ventilation with a mixture of helium and oxygen, the Hamilton G5 (Hamilton Medical, Switzerland) ventilator was used with a unit that provides the possibility of supplying this type of mixture. To simulate the lungs, we used TestChest Respiratory Flight Simulator (Organis GmbH, Switzerland) with settings reflecting the patient's respiratory system, both in normal and in pathological conditions. According to the results of the study, the composition of the inhaled gas mixture during lung ventilation with controlled volume does not affect the recorded inspiratory respiratory volume on the models of normal and pathological lungs. However, during artificial ventilation of lungs with a mixture of helium and oxygen with controlled pressure, statistically significant differences in the recorded inspiratory pressure in the Airways on the model of lungs were revealed in comparison with the mechanical ventilation oxygen-air mixture.

- **Keywords:** mixture of helium and oxygen, oxygen-air mixture, mechanical ventilation of the lungs, the model of the lungs

For correspondence: Ivan N. Grachev — adjunct of the department of anesthesiology and reanimatology Federal State Budgetary Educational Military Institution of Higher Education Military Medical Academy named after S.M. Kirov of the Ministry of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg; e-mail: GrachewIN@mail.ru

For citation: Grachev IN, Shchegolev AV. The influence of the composition of inhaled gas mixture in the inspiratory tidal volume and airway pressure during mechanical ventilation with controlled volume and pressure (experimental study). Alexander Saltanov Intensive Care Herald. 2018;2:61–8.

DOI: 10.21320/1818-474X-2018-2-61-68



Введение. С 1934 года, когда Varach впервые сообщил о клиническом использовании гелия, специалисты по респираторной медицине столкнулись с необходимостью оценивать функцию дыхания пациентов при применении смеси гелия и кислорода (ГКС), используя компоненты, не предназначенные для контроля этих газов [1]. Дополнительные решения к уже существующим методикам ИВЛ были ключом к внедрению ГКС в клиническую практику, но модификация коммерчески доступных устройств для работы за пределами их предполагаемых конструктивных ограничений создает ответственность для клинициста и лечебного учреждения и значительный риск для пациента [2].

Экспериментально доказано, что плотность ГКС (преимущественно за счет гелия) заметно ниже, чем у кислородно-воздушной смеси (КВС), что изменяет динамику потока внутри аппарата ИВЛ и системы клапанов. Движение потока дыхательной смеси, имеющего характер ламинарного или турбулентного, описывается числом Рейнольдса (Re) в соответствии со следующим уравнением:

$$Re = \frac{\dot{V}D\rho}{\mu}, \quad (1)$$

где \dot{V} — скорость потока (мл/с); ρ — плотность газа (г/мл); D — диаметр трубки (см); μ — вязкость газа (Па·с).

Число Рейнольдса более 4000 является предиктором турбулентного потока, а данная величина менее 2000 — ламинарного потока. В ламинарных условиях разность давлений (ΔP), требуемая для получения необходимого потока, определяется уравнением:

$$\Delta P = k1(\dot{V}lam), \quad (2)$$

где $k1$ — коэффициент линейного сопротивления из уравнения Пуазейля $= 8\eta/l\pi r^4$; η — вязкость газа (Па·с); l — длина трубки (см); $\dot{V}lam$ — скорость потока (мл/с) [3].

При турбулентном характере движения газа уравнение принимает следующий вид:

$$\Delta P = 2\rho(\dot{V}turb), \quad (3)$$

где ρ — плотность газа (г/мл); $\dot{V}turb$ — скорость потока (мл/с).

Вышеуказанные физические свойства гелия могут влиять на измеряемые параметры аппарата ИВЛ, такие как система смешивания газов и компенсации утечки, работа клапана вдоха и выдоха, точность измерений расхода газов и уровня положительного давления в конце выдоха (ПДКВ) [4]. В связи с этим актуальными остаются вопросы точности работы аппарата ИВЛ при использовании ГКС, влияющие на безопасность пациента. Только понимая, как устройство или система выполняет работу с ГКС, клиницисты могут безопасно применять данную газовую смесь.

Цель исследования. Оценить влияние состава вдыхаемой газовой смеси (ГКС, КВС) на регистрируемые показатели инспираторного дыхательного объема (V_t) при ИВЛ с управляемым объемом (VCV) и инспираторного давления в дыхательных путях (P_i) при ИВЛ с управляемым давлением (PCV) на модели нормальных и патологических (острый респираторный дистресс-синдром, ОРДС; хроническая обструктивная болезнь легких, ХОБЛ) легких.

Материалы и методы. Данное экспериментальное исследование проведено в симуляционном центре Фе-

Таблица 1

Настройки имитационной модели легких пациента TestChest® Respiratory Flight Simulator

Настраиваемый параметр механики дыхания	Модель неизменных легких	ОРДС	ХОБЛ
Утечка	нет	нет	нет
Сопротивление дыхательных путей	Rp 5	Rp 5	Rp 50
Податливость грудной клетки	200 мл/см вод. ст.	200 мл/см вод. ст.	200 мл/см вод. ст.
Общая податливость	50 мл/см вод. ст.	20 мл/см вод. ст.	60 мл/см вод. ст.
Нижняя точка перегиба	5 см вод. ст.	10 см вод. ст.	21 см вод. ст.
Податливость ниже нижней точки перегиба	50 мл/см вод. ст.	10 мл/см вод. ст.	42 мл/см вод. ст.
Верхняя точка перегиба	35 см вод. ст.	25 см вод. ст.	50 см вод. ст.
Податливость выше верхней точки перегиба	50 мл/см вод. ст.	5 мл/см вод. ст.	22 мл/см вод. ст.
ФОЕЛ при нулевом давлении в конце выдоха	2000 мл	2112 мл	2112 мл

ОРДС — острый респираторный дистресс-синдром; ХОБЛ — хроническая обструктивная болезнь легких

дерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации. Для проведения ИВЛ ГКС использовали аппарат ИВЛ Hamilton G5 (Hamilton Medical, Швейцария) с блоком, обеспечивающим возможность подачи ГКС.

Для имитации легких использовали TestChest® Respiratory Flight Simulator (Organis GmbH, Швейцария) с параметрами настройки, отражающими респираторную систему пациента без нарушений механики дыхания, ОРДС и ХОБЛ (табл. 1).

Из показателей TestChest использовали следующие:

1. Давление в дыхательных путях (см вод. ст.).

В ходе исследования проводили регистрацию изменения минимального давления в дыхательных путях (P_{min}), аналога положительного давления в конце выдоха (ПДКВ) и максимального давления в дыхательных путях (P_{max}) во время дыхательного цикла. Определение давления в дыхательных путях рассчитывали по следующей формуле:

$$P_i = P_{max} - P_{min}. \quad (4)$$

При этом учитывали тот факт, что при моделировании ОРДС в измерительной камере модели легких дополнительно создается давление для симуляции сниженной податливости легких.

2. Объем вдоха в легких (мл).

Проводили регистрацию изменения минимального объема легких (V_{min}), аналога ФОЕ (функциональная остаточная емкость легких), и максимального объема легких (V_{max}) в дыхательных путях во время дыхательного цикла. Определение объема вдоха в легких рассчитывали по следующей формуле:

$$V_t = V_{max} - V_{min}. \quad (5)$$

При измерении выявлено, что при моделировании ОРДС в измерительной камере модели легких вследствие поддержания дополнительного давления для симуляции сниженной податливости легких создается добавочный объем, который увеличивает дыхательный объем на величину, зависящую от уровня ПДКВ.

Показатели измеряли при использовании двух режимов ИВЛ: с управляемым объемом (VCV) на уровнях от 100 до 1000 мл, с шагом 100 мл в течение 10 дыхательных циклов, на каждом заданном уровне управления давлением от 5 до 20 см вод. ст., с шагом 5 см вод. ст., ПДКВ 5 см вод. ст., частотой дыхательных движений — 15 в минуту, время вдоха 1,3 с, пауза вдоха 0 %, соотношение фаз вдоха и выдоха 1 : 2; и с управляемым давлением (PCV) с параметрами — инспираторное давление от 5 до 20 см вод. ст., с шагом 5 см вод. ст. в течение 10 дыхательных циклов, ПДКВ 5 см вод. ст., время вдоха 1,3 с, $P_{гап}$ 0 мс, соотношение фаз вдоха и выдоха 1 : 2, частота дыхательных движений — 15 в минуту, с при-

Таблица 2

Объем вдоха при проведении искусственной вентиляции легких в режиме VCV при использовании кислородно-воздушной смеси и гелиево-кислородной смеси

№ п/п	Уровень дыхательного объема (мл)	КВС	ГКС
		Объем вдоха на модели легких TestChest $n = 10$ median (Q1; Q3) (мл)	Объем вдоха на модели легких TestChest $n = 10$ median (Q1; Q3) (мл)
Норма			
1	100	122,7 (121,0; 125,5)	110,8 (107,1; 114,4)
2	200	236,9 (235,3; 239,5)	214,5 (211,8; 217,6)
3	300	350,7 (348,6; 352,7)	316,7 (314,5; 319,4)
4	400	465,2 (460,6; 468,3)	418,1 (415,2; 419,1)
5	500	577,2 (574,3; 579,8)	509,3 (506,0; 511,9)
6	600	683,9 (681,9; 685,8)	605,9 (601,6; 610,2)
7	700	797,2 (793,8; 800,6)	696,2 (693,5; 697,8)
8	800	900,9 (896,8; 903,7)	792,8 (791,0; 794,6)
9	900	1009,6 (1002,9; 1015,5)	885,5 (883,9; 888,2)
10	1000	1119,6 (1105,5; 1118,0)	988,0 (976,6; 1003,8)
ОРДС			
11	100	160,5 (153,2; 167,3)	161,6 (161,2; 162,9)
12	200	297,8 (293,1; 302,4)	261,1 (258,3; 264,6)
13	300	423,4 (420,9; 427,8)	372,7 (368,7; 377,1)
14	400	536,4 (532,6; 541,2)	473,8 (470,2; 477,7)
15	500	658,6 (655,3; 661,2)	571,5 (569,2; 573,3)
16	600	805,4 (801,5; 809,0)	680,5 (677,1; 682,4)
17	700	847,7 (838,9; 855,6)	838,2 (819,3; 853,7)
18	800	994,1 (989,2; 998,1)	973,3 (970,3; 978,0)
19	900	1200,5 (1151,3; 1242,6)	1095,6 (1093,9; 1097,0)
20	1000	1336,9 (1332,9; 1340,6)	1202,8 (1201,8; 1205,1)
ХОБЛ			
21	100	121,5 (120,7; 121,6)	107,3 (106,4; 108,9)
22	200	227,8 (225,7; 229,5)	202,0 (200,3; 203,7)
23	300	336,6 (335,3; 337,7)	306,2 (299,2; 301,7)
24	400	444,9 (439,0; 450,5)	394,1 (392,4; 396,2)
25	500	560,1 (555,1; 564,1)	487,4 (486,3; 488,6)
26	600	664,4 (657,7; 669,9)	576,3 (573,8; 579,4)
27	700	778,4 (769,8; 786,0)	669,3 (667,6; 671,4)
28	800	890,2 (885,2; 895,3)	762,5 (757,7; 766,3)
29	900	984,8 (978,1; 989,0)	855,8 (850,4; 858,7)
30	1000	1078,1 (1070,6; 1083,8)	947,7 (942,6; 953,6)

менением КВС (30 % кислорода и 70 % воздуха) и ГКС (30 % кислорода и 70 % гелия). Все измерения проводили при комнатной температуре и влажности.

Таблица 3

Инспираторное давление в дыхательных путях при проведении искусственной вентиляции легких в режиме PCV с использованием кислородно-воздушной смеси и гелиево-кислородной смеси

№ п/п	Уровень инспираторного давления	КВС	ГКС
		Давление в дыхательных путях на модели легких TestChest <i>n</i> = 10 median (Q1; Q3) (см вод. ст.)	Давление в дыхательных путях на модели легких TestChest <i>n</i> = 10 median (Q1; Q3) (см вод. ст.)
Норма			
1	5 см вод. ст.	6,4 (6,26; 6,5)	7,17 (6,94; 7,17)
2	10 см вод. ст.	11,31 (11,2; 11,43)	12,11 (12,11; 12,27)
3	15 см вод. ст.	15,24 (15,07; 15,24)	16,8 (16,8; 17,03)
4	20 см вод. ст.	18,83 (18,65; 19,04)	21,52 (21,34; 21,67)
ОРДС			
5	5 см вод. ст.	10,2 (10,1; 10,5)	8,94 (8,83; 9,04)
6	10 см вод. ст.	14,34 (14,17; 14,55)	14,51 (14,37; 14,55)
7	15 см вод. ст.	19,16 (19,04; 19,26)	19,77 (19,61; 20,15)
8	20 см вод. ст.	23,29 (23,29; 23,46)	24,64 (24,46; 25,24)
ХОБЛ			
9	5 см вод. ст.	5,37 (5,36; 5,53)	6,1 (5,96; 5,53)
10	10 см вод. ст.	9,63 (9,63; 9,85)	10,3 (10,14; 10,32)
11	15 см вод. ст.	13,89 (13,89; 14,12)	15,07 (14,81; 15,24)
12	20 см вод. ст.	18,6 (18,6; 18,81)	19,94 (19,64; 20,11)

При статистической обработке полученных данных использовали программу R-studio (version 3.3.2 R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org>). Данные представлены в виде медианы (Me) [квартиль 1 (Q1); квартиль 3 (Q3)] для непараметрических данных. Для оценки влияния состава двух газовых смесей на регистрируемые показатели инспираторного дыхательного объема (V_t) при ИВЛ в режиме VCV и инспираторного давления в дыхательных путях (P_i) при ИВЛ в режиме PCV на модели нормальных и патологических (ОРДС, ХОБЛ) легких применили J-тест Дэвидсона—Маккиннона (Davidson—MacKinnon J-test) для невложенных моделей. Для применения данного теста строили модели с помощью линейного регрессионного анализа. Независимой величиной явились заданные на аппарате ИВЛ дыхательный объем и инспираторное давление, а зависимыми параметрами — соответствующие им расчетные V_t и P_i . Нормальность распределения регистрируемых параметров для построения регрессионных моделей оценивали с помощью графического и критериального (тест Шапиро—Уилка) методов. Вывод о наличии влияния состава газовой смеси на регистрируемые показатели делали при значимом ($p_M < 0,05$) улучшении только одной из моделей. Сравнение полученных моделей проводили с использованием пакета lmtree (Achim Zeileis, Torsten Hothorn (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. R News 2(3), 7–10. URL <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>).

Результаты. Данные, полученные при регистрации дыхательного объема, измеренного моделью легких при проведении ИВЛ в режиме VCV с использованием КВС и ГКС, представлены в табл. 2.

Данные, полученные при регистрации инспираторного давления, измеренного моделью легких при проведении ИВЛ в режиме PCV с использованием КВС и ГКС, представлены в табл. 3.

Для исключения влияния дополнительного объема и давления в измерительной камере модели, имитирующей сниженную податливость, при дальнейшем выполнении работы построены регрессионные модели, коэффициенты, характеристики и уравнения которых представлены в таблицах 4–7. Графические изображения представлены на рис. 1 и 2.

В табл. 5 представлены уравнения линейной регрессии, полученные на основе коэффициентов, описывающие зависимость заданного инспираторного дыхательного объема и дыхательного объема, регистрируемого моделью легких (V_t).

В табл. 7 представлены уравнения линейной регрессии, полученные на основе коэффициентов, описывающие зависимость заданного инспираторного давления (P) и регистрируемого моделью легких давления в дыхательных путях (P_i).

Все модели соответствуют требованиям, предъявляемым к регрессионным моделям, таким как линейность, нормальное распределение остатков, гомоскедастичность, независимость наблюдений и остатков.

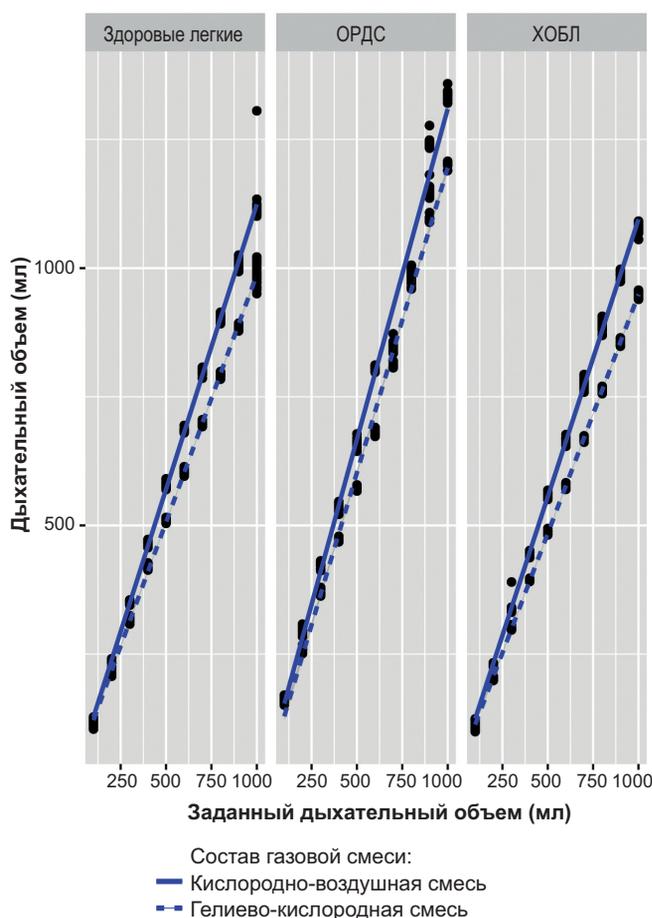


РИС. 1. График зависимости заданного инспираторного дыхательного объема и дыхательного объема, регистрируемого моделью легких при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) в режиме VCV

В дальнейшем провели попарное сравнение моделей при одинаковых режимах и патологиях с помощью пакета lmtest R для сравнения невложенных моделей.

При проведении J-теста Дэвидсона—Маккиннона были выявлены незначимые различия между моделями № 1 и 2 ($p_{M1} < 0,001$; $p_{M2} < 0,001$), моделями № 3 и 4 ($p_{M3} < 0,001$; $p_{M4} < 0,001$), моделями № 5 и 6 ($p_{M5} < 0,001$; $p_{M6} < 0,001$) и значимые различия между моделями № 7 и 8 ($p_{M7} < 0,001$; $p_{M8} = 0,263$), моделями № 9 и 10 ($p_{M9} < 0,001$; $p_{M10} = 0,559$), моделями № 11 и 12 ($p_{M11} < 0,001$; $p_{M12} = 0,876$).

Обсуждение результатов. Из уравнений (1), (2) и (3) следует, что при ламинарных условиях ΔP не зависит от плотности вдыхаемой газовой смеси, тогда как в турбулентных условиях ΔP зависит (чем ниже плотность, тем ниже Re и, следовательно, ниже коэффициент нелинейного сопротивления).

В то же время в некоторых работах [3] сообщается, что аппараты ИВЛ Veolar FT (Hamilton Medical, Швейцария), Servo 900C (Siemens-Elema, Швеция) оснащены одним клапаном вдоха, расположенным ниже по потоку от га-

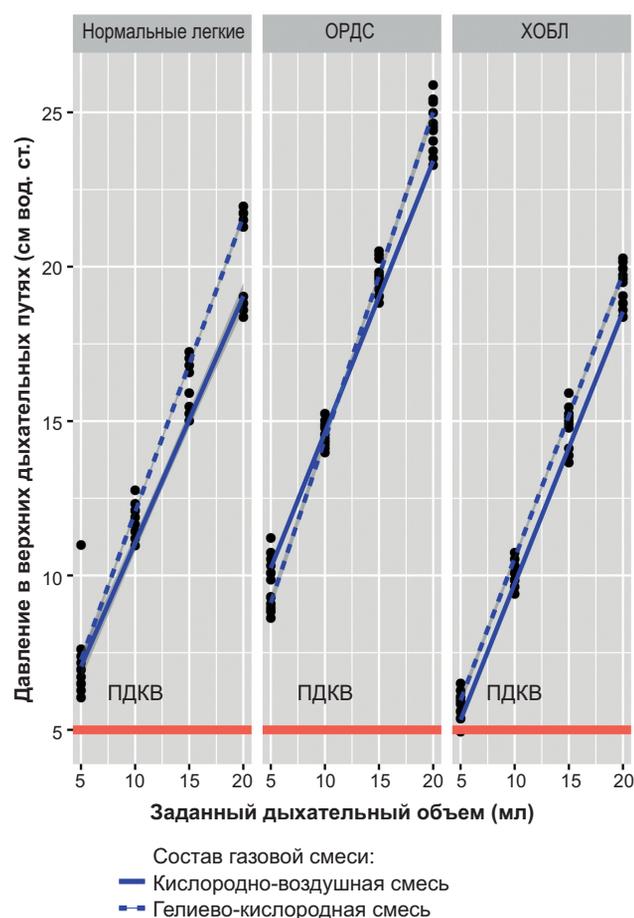


РИС. 2. График зависимости заданного инспираторного давления и давления в дыхательных путях, регистрируемого моделью легких при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) при искусственной вентиляции легких в режиме PCV. ПДКВ — положительное давление в конце выдоха

зового смесителя. Калибровка клапана выполняется для определенной фракции кислорода во вдыхаемой газовой смеси. Нет встроенной системы, предназначенной для изменения плотности газа. Следовательно, в этих аппаратах для данного ΔP в турбулентных условиях, которые преобладают в вентиляционных трубках и клапанах аппарата ИВЛ, чем ниже плотность вдыхаемого газа, тем выше поток.

Аппараты ИВЛ Evita 2 и Evita 4 (Drägerwerk, Германия) оснащены двумя пропорциональными клапанами для вдоха (один для воздуха, другой для кислорода) и системой смешивания газов, происходящего ниже по потоку от этих клапанов. Следовательно, замена воздуха ГКС должна по причинам, изложенным ранее, увеличивать поток через клапан, который обычно регулирует вход воздуха, в то время как на впускном клапане O_2 не будет никакого эффекта. Поскольку VT_i является результатом оттока из смесительной камеры, которая, в свою очередь, является результатом комбинированных потоков обоих газов, общий отток будет увеличен пропорционально фракции гелия, присутствующего в смеси [3].

Таблица 4

Коэффициенты линейной регрессии зависимости заданного инспираторного дыхательного объема и регистрируемого моделью легких дыхательного объема при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) в режиме VCV. Показатели моделей, полученных при регрессионном анализе

Показатели моделей	Независимая величина					
	Нормальное состояние легких		ОРДС		ХОБЛ	
	Заданный объем (КВС)	Заданный объем (ГКС)	Заданный объем (КВС)	Заданный объем (ГКС)	Заданный объем (КВС)	Заданный объем (ГКС)
Номер модели	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Объем на модели легких (зависимая величина)	1,107***	0,962***	1,284***	1,184***	1,078***	0,929***
Constant	17,069***	25,496***	25,580***	10,822**	16,768***	20,253***
Observations	100	100	100	100	100	100
R ²	0,998	0,999	0,991	0,995	0,999	0,999
Adjusted R ²	0,998	0,999	0,990	0,995	0,999	0,999
Residual Std. Error	15,094 (df = 100)	9,892 (df = 100)	37,241 (df = 100)	22,711 (df = 100)	10,311 (df = 100)	8,906 (df = 100)
F Statistic	101 654,800*** (df = 1; 100)	139 521,600*** (df = 1; 100)	16 974,180*** (df = 1; 100)	29 132,540*** (df = 1; 100)	135 967,500*** (df = 1; 100)	123 138,600*** (df = 1; 100)

Примечание: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

Модель № 1: режим VCV при дыхании КВС (30/70). Модель № 2: режим VCV при дыхании ГКС (30/70). Модель № 3: режим VCV при дыхании КВС (30/70) на модели легких с ОРДС. Модель № 4: режим VCV при дыхании ГКС (30/70) на модели легких с ОРДС. Модель № 5: режим VCV при дыхании КВС (30/70) на модели легких с ХОБЛ. Модель № 6: режим VCV при дыхании ГКС (30/70) на модели легких с ХОБЛ.

Таблица 5

Уравнения зависимости заданного инспираторного дыхательного объема (V_t) и регистрируемого моделью легких дыхательного объема V_{t_i} при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) в режиме VCV, полученные при регрессионном анализе

№ модели	Уравнение линейной регрессии
1	$V_{t_i} = 17,069 + 1,107V_t$
2	$V_{t_i} = 25,496 + 0,962V_t$
3	$V_{t_i} = 25,580 + 1,284V_t$
4	$V_{t_i} = 10,822 + 1,184V_t$
5	$V_{t_i} = 16,768 + 1,078V_t$
6	$V_{t_i} = 20,253 + 0,929V_t$

Такие аппараты ИВЛ, как Hamilton Galileo и G-5 (Hamilton Medical, Швейцария), используют пневмотахометр для измерения объемного расхода газовой смеси. Данный прибор расположен у Y-разъема и измеряет потоки вдоха и выдоха. Пневмотахометр рассчитывает параметры при турбулентном потоке для достижения необходимой точности. Высокая концентрация гелия переводит турбулентный поток в ламинарный, что снижает сопротивление потоку, проходящему через прибор, и уменьшает ΔP [5].

Основываясь на вышеуказанных данных, а также на исследованиях [3, 6–8], при проверке наиболее распространенных аппаратов ИВЛ при замене КВС на смесь ГКС выявлено несоответствие между задаваемыми параметрами на аппарате и фактически измеренными показателями различных тестирующих систем. Для устранения этого несоответствия рядом авторов были предложены поправочные коэффициенты для пересчета задаваемых параметров, которые могут применяться специалистами для контроля доставки смеси гелия и кислорода данными аппаратами в дыхательные пути больного при различных режимах вентиляции [3, 4].

В то же время в доступной литературе и в технической документации отсутствуют данные о проведении такой проверки современных респираторов, в том числе Hamilton G5, имеющего возможность выбора вдыхаемой газовой смеси.

В нашем исследовании установлено, что при изменении состава дыхательной смеси в режиме VCV параметры вентиляции аппарата не требуют коррекции, что подтвердило сравнение регрессионных моделей, при котором выявлено отсутствие различий в величине дыхательного объема при изменении дыхательной смеси.

Значительное увеличение дыхательного объема вдоха (VCV) и инспираторного давления (PCV) при моделировании ОРДС явилось результатом дополнительного давления и объема, возникающего в измерительной камере модели, необходимого для симуляции низкой податливости легких.

Таблица 6

Коэффициенты линейной регрессии зависимости заданного инспираторного давления и регистрируемого моделью легких давления в дыхательных путях при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) при искусственной вентиляции легких в режиме PCV. Показатели моделей, полученных при регрессионном анализе

Показатели моделей	Независимая величина					
	Нормальное состояние легких		ОРДС		ХОБЛ	
	Заданное давление (КВС)	Заданное давление (ГКС)	Заданное давление (КВС)	Заданное давление (ГКС)	Заданное давление (КВС)	Заданное давление (ГКС)
Номер модели	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Давление на модели легких (зависимая величина)	0,808***	0,951***	0,877***	1,052***	0,877***	0,922***
Constant	2,942***	2,558***	5,876***	3,928***	0,978***	1,380***
Observations	40	40	40	40	40	40
R ²	0,979	0,998	0,996	0,994	0,998	0,996
Adjusted R ²	0,979	0,998	0,996	0,994	0,998	0,996
Residual Std. Error	0,666 (df = 40)	0,253 (df = 40)	0,300 (df = 40)	0,430 (df = 40)	0,227 (df = 40)	0,327 (df = 40)
F Statistic	2829,235*** (df = 1; 40)	19 074,530*** (df = 1; 40)	18 604,870*** (df = 1; 40)	8102,214*** (df = 1; 40)	45 089,940*** (df = 1; 40)	13 832,270*** (df = 1; 40)

Примечание: * $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

Модель № 7: режим PCV при дыхании КВС (30/70). Модель № 8: режим PCV при дыхании ГКС (30/70). Модель № 9: режим PCV при дыхании КВС (30/70) на модели легких с ОРДС. Модель № 10: режим PCV при дыхании ГКС (30/70) на модели легких с ОРДС. Модель № 11: режим PCV при дыхании КВС (30/70) на модели легких с ХОБЛ. Модель № 12: режим PCV при дыхании ГКС (30/70) на модели легких с ХОБЛ.

Таблица 7

Уравнения зависимости заданного инспираторного давления (P) и регистрируемого моделью легких давления в дыхательных путях (Pi) при дыхании кислородно-воздушной смесью (30/70) и гелиево-кислородной смесью (30/70) в режиме VCV, полученные при регрессионном анализе

№ модели	Уравнение линейной регрессии
7	$P_i = 2,942 + 0,808P$
8	$P_i = 2,558 + 0,951P$
9	$P_i = 5,876 + 0,877P$
10	$P_i = 3,928 + 1,052P$
11	$P_i = 0,978 + 0,877P$
12	$P_i = 1,380 + 0,922P$

Однако эта особенность не влияла на результаты полученных измерений, так как объем и давление газовой смеси в модели легких увеличивались на строго определенную величину при проведении ИВЛ КВС и ГКС на определенном уровне измерений. При этом сравнение проводилось между моделями, описывающими зависимость между исследуемыми параметрами при одинаковых настройках TestChest, определяющих параметры биомеханики дыхания.

Анализ полученных данных при применении режима принудительной вентиляции легких в режиме PCV пока-

зал статистически значимые различия в величине давления в дыхательных путях при изменении подаваемой дыхательной смеси. По нашему мнению, данное различие явилось результатом уменьшения ΔP вследствие снижения сопротивления дыхательных путей модели легких, создаваемого ГКС, в связи с более низкой плотностью гелия. Данное положение может быть причиной возникновения более высокого инспираторного давления в дыхательных путях при изменении газовой смеси с КВС на ГКС, что, возможно, может потребовать коррекции параметров аппарата ИВЛ. Таким образом, применение данной методики с использованием ИВЛ с управлением по давлению требует расширенного респираторного мониторинга.

Выводы

1. Состав вдыхаемой газовой смеси (ГКС, ВКС) при вентиляции легких с управляемым объемом не влияет на регистрируемый инспираторный дыхательный объем на модели нормальных и патологических (ОРДС, ХОБЛ) легких.
2. Состав вдыхаемой газовой смеси (ГКС, ВКС) при вентиляции легких с управляемым давлением влияет на регистрируемое инспираторное давление в дыхательных путях на модели нормальных и патологических (ОРДС, ХОБЛ) легких.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Щеголев А.В. — научное руководство, редактирование статьи; Грачев И.Н. — набор и обработка материала, написание статьи.

ORCID авторов

Щеголев А.В. — 0000-0001-6431-439X

Грачев И.Н. — 0000-0003-0678-8524

Литература/References

1. *Красновский А.Л., Григорьев С.П., Алехин А.И., Потапов В.Н.* Применение подогретой кислородно-гелиевой смеси в комплексном лечении пациентов с внебольничной пневмонией. *Клиническая медицина.* 2013; 5: 38–41. [*Krasnovsky A.L., Grigoriev S.P., Alekhin A.I., Potapov V.N.* Application of heated oxygen-helium mixture for combined treatment of community-acquired pneumonia. *Klinicheskaya medicina.* 2013; 5: 38–41. (In Russ)].
2. *Fink J.* Opportunities and risks of using heliox in your clinical practice. *Respiratory care.* 2006; 6: 651–660.
3. *Tassaux D., Jolliet P., Thouret J., et al.* Calibration of seven ICU ventilators for mechanical ventilation with helium-oxygen mixtures. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1999; 1: 22–32.
4. *Brown M., Willms D.* A Laboratory Evaluation of 2 Mechanical Ventilators in the Presence of Helium-Oxygen Mixtures. *Respir. Care.* 2005; 3: 354–360.
5. *McArthur C, Adams A., Suzuki S.* Effects of helium/oxygen mixtures on delivered and expired tidal volume during mechanical ventilation. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1996; 1: 370.
6. *Jaber S., Fodil R., Carlucci A., et al.* Noninvasive ventilation with helium-oxygen in acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2000; 161: 1191–1200.
7. *Oppenheim-Eden A., Cohen Y., Weissman C., Pizov R.* The effect of helium on ventilator performance: study of five ventilators and a bedside Pitot tube spirometer. *Chest.* 2001; 2: 582–588.
8. *Venkataraman S.* Heliox during mechanical ventilation. *Respir. Care.* 2006; 6: 632–639.

Поступила 03.05.2018